

**ВЕНДЕРЕВСКАЯ** ИРИНА ГЕННАДЬЕВНА

**ОПТИЧЕСКИЙ БЛОК МАЛОГАБАРИТНОГО  
СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

**05.11.13** - Приборы и методы контроля природной среды, **веществ,**  
материалов и изделий



Автореферат  
**диссертации** на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2003

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Павлычева Н.К.

Официальные оппоненты: доктор физ-мат наук, профессор  
Филиппов В.Л.,  
доктор технических наук, профессор  
Ильин Г.И.

Ведущая организация: ЦКБ «Фотон»

Защита состоится «2» июня 2003г. на заседании диссертационного  
совета Д212.079.04 в Казанском государственном техническом университете  
(420111, г Казань, ул. Карла Маркса, 10)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского  
государственного технического университета

Автореферат разослан «29» апреля 2003г.

Ученый секретарь диссертационного совета,



Козлов В.А.

## **Актуальность темы**

Спектральные приборы широко применяются для контроля материалов и изделий в различных областях науки и техники. Как правило, это дорогостоящие стационарные комплексы, однако, существует большое количество задач, для решения которых требуются малогабаритные автоматизированные спектральные приборы, пригодные для максимального приближения измерений к цеховым, сертификационным, складским центрам контроля продукции. Особенно широка потребность в таких приборах в металлургии и металлообработке.

Однако оснащенность предприятий указанными приборами, тем более автоматизированными, крайне неудовлетворительна. Дооснащение промышленности за счет зарубежных аналогов из-за их высокой стоимости не является выходом, приемлемым в современных условиях. В свою очередь, отечественные разработки спектральных приборов, отвечающих новым требованиям, на предприятиях, традиционно выполняющих их серийный выпуск, не проводились.

С учетом вышеизложенного, исследование и разработка малогабаритного эмиссионного **спектроанализатора** для определения химического состава одного из основных материалов промышленности - конструкционных сталей - является весьма **актуальной**.

Анализ современных разработок отечественных спектральных приборов показал, что в конструкции малогабаритного автоматизированного спектрографа "Сириус" в значительной степени учтены современные тенденции в спектральном приборостроении: оптическая схема построена на вогнутых **голограммных** решетках с коррекцией аберраций, прибор имеет многоканальную электронную систему регистрации, основанную на фотодиодной линейке. Однако, несмотря на существенные достоинства указанный прибор не позволяет обеспечить обозначенную в работе задачу - анализ конструкционных сталей и сплавов, так как не обеспечивает выполнение измерений в необходимом спектральном диапазоне. С другой стороны, малогабаритный автоматизированный спектрограф «Сириус» следует рассматривать как базовый прототип, в котором отработаны необходимые элементы технологического обеспечения его производства в заводских условиях.

Целью настоящей работы является создание оптического блока спектроанализатора для эмиссионного анализа конструкционных сталей на базе модернизации оптического блока спектрографа "Сириус".

Для достижения указанной цели требовалось решить **следующие задачи:**

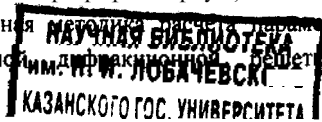
1. Поиск на основе анализа литературных данных и экспериментальных исследований технических характеристик и наиболее перспективных направлений исследования по созданию **спектроанализатора**;
2. Анализ существующих оптических схем и поиск наиболее перспективных для применения в оптическом блоке спектроанализатора для контроля конструкционных сталей;
3. Разработка новых способов записи дифракционной решетки в соответствии с оптической схемой спектроанализатора для контроля конструкционных сталей;
4. Математическое моделирование и оценка качества спектра разработанного оптического блока спектроанализатора;
5. Разработка и построение экспериментального макета малогабаритного спектроанализатора для контроля сталей и сплавов.

Научная новизна работы:

1. Критерий отбора совокупности спектральных линий для идентификации сортов конструкционных сталей, применительно к задаче создания специализированного малогабаритного спектроанализатора;
2. Результаты исследований оптической схемы спектрографа на основе вогнутой **голограммной** дифракционной решетки (**ВДР**), записанной в **негомоцентрических** пучках;
3. Математическая модель и результаты исследования вогнутой **голограммной** дифракционной решетки, обеспечивающей в схеме спектрографа минимизацию дефокусировки, астигматизма и меридиональной и сагиттальной комы;
4. Новые способы записи вогнутых **голограммных** дифракционных решеток.

Практическая ценность работы определяется следующими результатами:

1. Экспериментальные исследования на макете прибора с многоканальной регистрацией спектра показали возможность проведения на нем количественного анализа конструкционных сталей;
2. Расшифрованную спектрограмму железа в диапазоне 272-333 нм и методику калибровки прибора на базе спектрограммы железа можно использовать для работы на спектрографе "Сириус";
3. Предложена **научная новизна** в разработке голографирования вогнутой голограммной дифракционной решетки, обеспечивающих в схеме



спектрографа минимизацию дефокусировки, астигматизма и меридиональной и сагиттальной комы, позволяет реализовать условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем спектральном диапазоне;

4. Полученные выражения для определения параметров голографирования для симметричной схемы записи, позволяют реализовать более технологичную схему записи;
5. Предложен метод юстировки спектрографа с многоканальной фотоэлектрической регистрацией спектра;
6. Реализация разработки позволит создать промышленный образец малогабаритного и сравнительно дешевого **спектроанализатора** для массового анализа конструкционных сталей.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Критерий отбора совокупности спектральных линий для идентификации сортов конструкционных сталей на приборе с многоканальной фотоэлектрической регистрацией спектра;
2. Оптические схемы записи вогнутой **голограммной** дифракционной решетки в негомоцентрических пучках на основе дифракционных решеток и вогнутых зеркал.
3. Алгоритм расчета параметров **голографирования**, обеспечивающий коррекцию дефокусировки, астигматизма и меридиональной и сагиттальной комы и **позволяющий** при дополнительном параметре **реализовать** условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем спектральном диапазоне.
4. Соотношения для определения параметров голографирования для симметричной схемы записи.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на V Международной конференции «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург-2002), на ВУЗовских конференциях и на **кафедре** оптико-электронных систем Казанского государственного технического университета.

Личный вклад

Все результаты, изложенные в настоящей работе, получены лично автором.

## Публикации

По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 1 патент РФ, 2 статьи в журнале «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева», 1 публикация тезисов доклада в сборнике трудов Международной конференции и 6 публикаций тезисов докладов из которых 5 на Всероссийских конференциях и 2 на Международных конференциях.

## Объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материалы диссертации изложены на 163 страницах машинописного текста и содержат 45 рисунков, 86 формул и 23 таблицы. В списке цитируемой литературы 92 наименования, из которых 11 публикаций автора.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи диссертации.

В первой главе представлен обзор публикаций, посвященных составу конструкционных сталей и спектральным приборам для его анализа.

В разделе 1.1 на основе литературных данных определены химические элементы, наличие (или отсутствие) которых необходимо контролировать для обеспечения требуемых механических характеристик конструкционных материалов: углерода, кремния, марганца, хрома, никеля, меди, молибдена, ванадия, титана, бора и кобальта.

В разделе 1.2 показано, что наибольшее число оптических схем приборов для проведения эмиссионного спектрального анализа являются спектрографами на основе вогнутых **голограммных** дифракционных решетках с коррекцией аберраций.

Большинство фирм, занимающихся разработкой спектральной аппаратуры, выпускают приборы с многоканальной системой регистрации. В качестве приемников излучения в таких приборах используют фотодиодные и/или ПЗС линейки. Разрабатываемые приборы представляют собой **спектроаналитические** комплексы, в состав которых входят источник излучения, осветительная система, спектральный блок и многоканальная

система регистрации. Приборы управляются персональными компьютерами или встроенными процессорами, ими же осуществляется сбор и обработка информации. Прослеживаются тенденции к разработке специализированных моделей, предназначенных для решения узких задач.

В течение длительного времени развитию аналитического приборостроения в нашей стране не уделялось должного внимания. По данным на 1992г. потребность в таких приборах в России удовлетворена на 25%, а объем выпускаемой у нас оптико-спектральной аппаратуры составлял всего 4-5% мирового выпуска.

Наиболее **подходящим** по техническим характеристикам является малогабаритный автоматизированный спектрограф **«Сириус»**, соответствующий тенденциям современного спектрального приборостроения. Однако, несмотря на большой диапазон работы прибора, ни из сменных дифракционных решеток не обеспечивает спектрального диапазона, требуемого для анализа конструкционных сталей и сплавов. Поэтому требуется разработка оптического блока **спектроанализатора** для эмиссионного анализа конструкционных сталей на базе модернизации оптического блока спектрографа «Сириус».

Вторая глава посвящена выработке технических требований к прибору для проведения количественного анализа образцов стали.

В разделе 2.1 рассмотрена оптическая схема прибора для проведения экспериментов и его характеристики. Эксперименты проводились на малогабаритном автоматизированном спектрографе Сириус. В состав спектрографа входят: спектральный блок, блок излучения, станина, конденсор с диафрагмой, генератор дуги, персональный компьютер. Прибор оснащен фотоэлектрической системой регистрации с использованием фотодиодной линейки длиной 29 мм (2048 элементов, размер элемента **0,014×0,15** мм).

В разделе 2.2 описан ход эксперимента, определены оптимальные для данной задачи параметры работы прибора. Проведена градуировка спектрографа в диапазоне 245-335 нм. Для экспериментальных исследований использовался комплект эталонов для спектрального анализа сплава на железной основе марки **H29K18**. Проведена расшифровка полученных спектрограмм эталонных образцов. Спецификой приборов с многоканальной фотоэлектрической регистрацией является то, что все анализируемые линии должны одновременно присутствовать в сравнительно небольшом спектральном диапазоне. Поэтому необходимо было провести анализ

**спектральных** линий примесей, находящиеся в исследуемом диапазоне, для определения возможности их использования наряду с рекомендованными в литературе. Предложен критерий отбора и новая совокупность спектральных линий для идентификации сортов конструкционных сталей.

Так как высота фотодиодной линейки составляет **0,15** мм, очень важна взаимная ориентация изображения спектра и фотодиодной линейки. Для юстировки оптического блока предложено использовать метод определения линейных и угловой координат объекта по однострочному сканированию.

Экспериментальные исследования показали, что оптический блок **спектроанализатора** для проведения анализа наиболее распространенных конструкционных материалов должен иметь следующие оптические характеристики:

относительное отверстие **1:10**,  
 спектральный диапазон работы **245-335**нм,  
 спектральный предел разрешения **0,06** нм,  
 обратная линейная дисперсия  **$\approx 2$ нм/мм**,  
 радиус дифракционной решетки **200** мм.

В третьей главе проведен анализ существующих оптических схем и показано, что наиболее перспективна оптическая схема спектрального **прибора, построенного** на вогнутой **голограммной** дифракционной решетке с коррекцией aberrаций.

В разделе **3.1** приведены результаты разработки оптической схемы по методу расчета оптической схемы спектрографа с расширенным спектральным диапазоном.

В соответствие с этим методом, конструктивные параметры схемы связаны следующими эмпирическими **соотношениями**:

$$\begin{aligned} d &= r[1,0105 - 0,0393(k\lambda_{cp}N)] \\ d_0' &= r[1,0037 - 0,014(k\lambda_{cp}N) + 0,058(k\lambda_{cp}N)^2] \\ \varphi &= -0,016 + 0,748(k\lambda_{cp}N), \end{aligned} \quad (1)$$

где  **$d$**  - расстояние от входной щели до вершины решетки,

**$d_0'$**  - расстояние от вершины решетки до плоскости регистрации **спектра**,

**$\varphi$**  - угол падения,

**$k$**  - порядок **спектра**,

**$\lambda_{cp}$**  - средняя длина волны рабочего **диапазона**,

**$N$**  - частота решетки.



Из соотношений (1) определены конструктивные параметры схемы:  $d=198,442$  мм,  $d'_0=203,932$  мм,  $\varphi=23^\circ56'$ . Оптическая схема представлена на рис. 1.

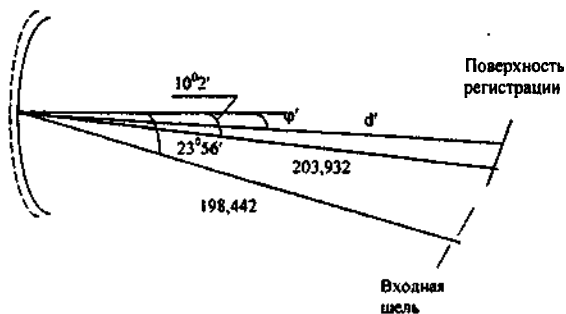


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа.

Для определения параметров голографирования были использованы коэффициенты абберационной функции ВГДР:

$$V(y, z) = -yF_0 + \frac{z^2}{2r}F_1 + \frac{z^2}{2r}F_2 + \frac{y^3}{2r^2}F_3 + \frac{yz^2}{2r^2}F_4 + \frac{y^4}{8r^3}F_5 \quad (2)$$

Коэффициенты  $F_i$  характеризуют абберации решетки:

$F_1$  - фокусировку лучей в меридиональной плоскости,

$F_2$  - фокусировку лучей в сагиттальной плоскости,

$F_3$  - меридиональную кому,

$F_4$  - сагиттальную кому,

$F_5$  - сферическую абберацию 3-го порядка.

Коэффициенты  $M_i$  являются функциями от параметров схемы  $d, d'_0, \varphi, \varphi'$ ,  $N$ , а  $H_i$  - от параметров записи расстояний от вершины решетки до источников голографирования  $d_1, d_2$  и углов падения лучей от источников голографирования в вершину решетки  $i_1, i_2$ . Частота штрихов определяется соотношением:

$$\frac{1}{N} = \frac{\lambda_0}{\sin i_1 - \sin i_2}, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны голографирования.

С полученными конструктивными параметрами были определены  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$ . Коэффициенты голографирования  $H_1, H_2, H_3$  определены из условия равенства нулю соответствующей абберации для длин волн

удовлетворяющих условию  $\lambda_{cp} \pm (\lambda_1 - \lambda_2)/4$ . Коэффициенты голографирования  $H_4$  и  $H_5$  определены из условия равенства нулю соответствующей аберрации для средней длины волны спектрального диапазона.

$$M_i = \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_i \quad (4).$$

В разделе 3.2 из условий корректировки дефокусировки, астигматизма и меридиональной комы, с учетом соотношения (3), определены параметры голографирования для схемы записи в гомоцентрических пучках. Проведен аберрационный расчет спектрографа с такой решеткой. В меридиональном сечении аберрации скомпенсированы, однако величина сагиттальной комы недопустимо велика.

Рассмотрен случай применения тороидальной подложки в разработанной оптической схеме. В этом случае сагиттальная кома полностью скомпенсирована для средней длины волны и имеет маленькие значения по всему спектральному диапазону, но астигматизм на краях спектрального диапазона почти на порядок больше, чем соответствующие значения в схеме с решеткой на сферической подложке.

В разделе 3.3 определены параметры записи решетки в негомоцентрических пучках (рис.2), позволяющие скорректировать дефокусировку, астигматизм, меридиональную и сагиттальную комы и сферическую аберрацию 3-го порядка.

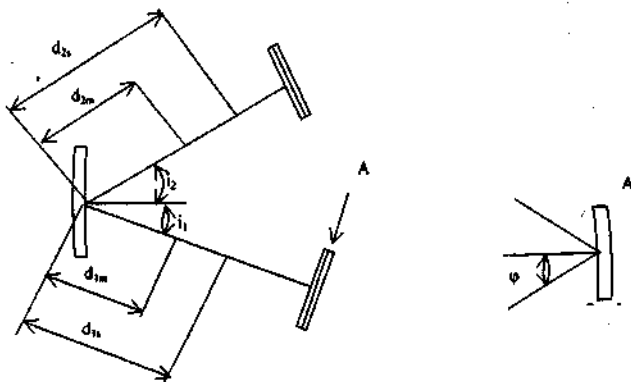


Рис.2. Принципиальная схема записи ВГДР в негомоцентрических пучках

При таком типе записи четыре параметра определяют положение источников в меридиональной плоскости: расстояния от вершины подложки до источников записи  $d_{1m}$   $d_{2m}$  и углы падения лучей от источников записи в

вершину подложки  $g, i_2$ . Два дополнительных параметра  $d_{1S}$  и  $d_{2S}$  определяют положение источников записи в сагиттальной плоскости. Параметры записи  $d_{1m}, d_{2m}, i_1, i_2$  определяются из условий минимизации в плоскости спектра дефокусировки, меридиональной комы и сферической aberrации 3-го порядка, а параметры  $d_{1S}$  и  $d_{2S}$  - из условий минимизации в плоскости спектра астигматизма и сагиттальной комы.

Определены параметры голографирования и проведен aberrационный расчет спектрографа на основе дифракционной решетки, записанной в негомоцентрических пучках. Рассмотрены случаи фокусировки спектра на участке цилиндрической Поверхности и двух фотодиодных линейках. В сагиттальном сечении значения aberrации  $\delta y'$  в плоскости дисперсии практически равны нулю, а в меридиональном сечении для максимальной апертуры не превышают 0,037 мм (при использовании двух фотодиодных линеек).

Учитывая, что относительное отверстие невелико, а, значит, вклад сферической aberrации незначителен по сравнению с вкладом дефокусировки, предложена методика расчета, при которой корректируются дефокусировка, астигматизм и меридиональная и сагиттальная комы. При этом необходимо скорректировать четыре параметра, поэтому появляется возможность задавать произвольное значение угла голографирования  $i_2$ . Это позволяет определять значение этого угла из условия получения максимальной дифракционной эффективности в рабочем спектральном диапазоне. Задавая произвольное значение угла голографирования  $i_2$ , значение угла  $i_1$  определяем из (3), значения параметров голографирования  $d_{1m}, d_{2m}$  - из условий минимизации в плоскости спектра дефокусировки и меридиональной комы, а параметры  $d_{1S}$  и  $d_{2S}$  - из условий минимизации в плоскости спектра астигматизма и сагиттальной комы.

Полученные соотношения для определения параметров голографирования обеспечивают в схеме спектрографа коррекцию дефокусировки, астигматизма и меридиональной и сагиттальной комы:

$$i_1 = \arcsin(\lambda_0 N + \sin i_2), \quad \frac{r}{d_{2m}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \frac{r}{d_{1m}} = \frac{r}{d_{2m}} + d, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a &= \sin i_1 \cos^2 i_1 - \sin i_2 \cos^2 i_2, \quad b = \sin i_1 \cos i_1 + 2 \sin i_1 \cos^2 i_1 \left( \frac{H_1 + \cos i_1 - \cos i_2}{\cos^2 i_2} \right) + \sin i_2 \cos i_2, \\ c &= \sin i_1 \cos i_1 \left( \frac{H_1 + \cos i_1 - \cos i_2}{\cos^2 i_2} \right) - \sin i_1 \cos^2 i_1 \left( \frac{H_1 + \cos i_1 - \cos i_2}{\cos^2 i_2} \right)^2 - H_3, \quad d = \frac{H_1 + \cos i_1 - \cos i_2}{\cos^2 i_2}, \\ \frac{r}{d_{1S}} &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c(\sin i_2 - \sin i_1)}}{2(\sin i_2 - \sin i_1)}, \quad \frac{r}{d_{2S}} = \frac{r}{d_{1S}} + a, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a = \cos i_2 - \cos i_1 - H_2$ ,  $b = \sin i_1 \cos i_1 - \sin i_2 \cos i_2 + 2 \sin i_2 (\cos i_2 - \cos i_1 - H_2)$ ,  
 $c = \sin i_2 (\cos i_2 - \cos i_1 - H_2)^2 - \sin i_1 \cos i_1 (\cos i_2 - \cos i_1 - H_2) - H_4$ .

Задавая углы голографирования равными друг другу, получаем более технологичную симметричную схему записи. В этом случае в выражениях для коэффициентов голографирования имеем:  $i_1 = i_2 = i$ . Полученные соотношения для **определения** параметров голографирования в симметричной схеме имеют более простой вид, что способствует ускорению инженерных расчетов:

$$i = \arcsin \frac{\lambda N}{2}, \quad \frac{r}{d_{2m}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad \frac{r}{d_{1m}} = \frac{H_1}{\cos^2 i} + \frac{r}{d_{2m}} \quad (7)$$

где  $a = -2 \cos i$ ,  $b = 2 - \frac{2H_1}{\cos i}$ ,  $c = \frac{H_1}{\cos^2 i} - \frac{H_1^2}{\cos^2 i} - \frac{H_1}{\sin i \cdot \cos i}$ ;

$$\frac{r}{d_{2s}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 8c}}{-4}, \quad \frac{r}{d_{1s}} = H_1 + \frac{r}{d_{2s}}, \quad (8)$$

где  $b = 2 \cos i - 2H_1$ ,  $c = H_2 \cos i - H_2^2 - \frac{H_4}{\sin i}$ .

Результаты абберационного расчета оптической схемы спектрографа с дифракционной решеткой, записанной по симметричной схеме, практически совпадают с соответствующими абберациями схемы с решеткой, **дающей** коррекцию и сферической абберации.

В разделе 3.4 определены допуски на параметры голографирования.

Допуски на параметры голографирования в меридиональном сечении определяются из формул, полученных дифференцированием соответствующих членов абберационной функции:

$$\frac{d'y}{\cos \varphi'} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{\cos^2 i}{d_i^2} \Delta d_i = \frac{\Delta \delta y'_i}{2} \quad (9)$$

$$\frac{d'y}{\cos \varphi'} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0} \left( \frac{\sin i}{r} - \frac{\sin 2i}{d_i} \right) \Delta i = \frac{\Delta \delta y'_\Sigma}{2} \quad (10)$$

Допуски на параметры в **сагиттальном** сечении определяются из формулы:

$$\frac{\Delta \delta y'_k}{1,41} = \frac{d'z^2 \sin i k \lambda}{\cos \varphi' d_{2s}^2 \lambda_0} \cdot \left( \frac{1}{d_u} - \frac{\cos i}{2 \cdot r} \right) \Delta d_{2s} \quad (11)$$

Полагая  $\Delta \delta y'_\Sigma = 0,001$  мм и  $\Delta \delta y'_k = 0,001$  мм, получаем, что допуски на параметры составят: для ВГДР с коррекцией дефокусировки, астигматизма, меридиональной и сагиттальной комы и сферической абберации 3-го порядка -  $\Delta d_{1m} = 0,019$  мм,  $\Delta d_{2m} = 0,013$  мм,  $\Delta d_{1s} = 2,007$  мм,  $\Delta d_{2s} = 4,642$  мм,  $\Delta i_1 = 30''$ ,  $\Delta i_2 = 1'$ , а для ВГДР с **коррекцией** дефокусировки, астигматизма и меридиональной и

сагиттальной комы -  $\Delta d_{1m}=0,020$  мм,  $\Delta d_{2m}=0,014$  мм,  $\Delta i=45''$ ,  $\Delta d_{1s}=1,495$  мм,  $\Delta d_{2s}=2,780$  мм.

Глава 4 посвящена разработке оптических схем записи ВГДР и оценке качества изображения спектра.

С целью расширения технологических возможностей в разделах 4.1 и 4.2 разработано по три варианта схем записи для ВГДР с коррекцией дефокусировки, астигматизма, меридиональной и сагиттальной комы и сферической аберрации 3-го порядка и для ВГДР с коррекцией дефокусировки, астигматизма, меридиональной и сагиттальной комы:

- **с помощью** вогнутых зеркал, работающих **в наклонном** пучке (тип 1);
- с помощью дифракционных решеток (тип 2);
- **с помощью** вогнутых зеркал, работающих на **круге Роуланда** (тип 3).

В случае использования сферических зеркал, при наклонном падении на них параллельных пучков лучей, величина **негомоцентричности** определяется из выражения:

$$\Delta = \frac{r \cdot \cos \varphi}{2} - \frac{r}{2 \cdot \cos \varphi}. \quad (12)$$

где  $r$  - радиус кривизны **зеркала**,

$\varphi$  - угол между лучом, падающим в вершину зеркала и нормалью к зеркалу,

Для получения астигматической разности  $L$  с помощью дифракционной решетки в установке на **круге Роуланда** необходимо совместное выполнение следующих соотношений:

$$\begin{cases} \frac{1}{\cos \varphi} + \frac{1}{\cos \varphi' + \frac{\Delta}{r}} - \cos \varphi - \cos \varphi' = 0; \\ \sin \varphi' = k \lambda_0 N - \sin \varphi \end{cases} \quad (13)$$

В схеме записи с помощью вогнутых зеркал, работающих в установке на **круге Роуланда**, значение угла  $\varphi$  -  $\varphi'$  определится из соотношений (11) при  $k=0$ .

В первой ветви схемы записи (осветитель" 1) **негомоцентричность** составила  $L_1 = d_{1s} - d_{1m} = 57,87$  мм, а во второй (осветитель 2) -  $\Delta_2 = d_{2s} - d_{2m} = 30,37$  мм. Для создания требуемой негомоцентричности в схеме записи ВГДР с коррекцией дефокусировки, **астигматизма**, меридиональной и сагиттальной комы и сферической аберрации 3-го порядка осветители должны иметь следующие параметры:

	тип 1	тип 2	тип 3
первый осветитель ( $\Delta_1 = 57,87$ мм)	$r=200$ мм, $\varphi=41^{\circ}16'$	$r=200$ мм, $N=600\text{мм}^{-1}$ , $\varphi=25^{\circ}21'$ , $\varphi'=-9^{\circ}24'$	$r=200$ мм, $\varphi=20^{\circ}4'$
второй осветитель ( $\Delta_2 = 30,37$ мм)	$r=200$ мм, $\varphi=30^{\circ}44'$	$r=200$ мм, $N=600\text{мм}^{-1}$ , $\varphi=20^{\circ}8'$ , $\varphi'=-4^{\circ}33'$	$r=200$ мм, $\varphi=15^{\circ}7'$

Для создания требуемой **негомоцентричности** в схеме записи ВГДР с коррекцией дефокусировки, астигматизма и меридиональной и сагиттальной комы осветители **должны** иметь следующие параметры:

	тип 1	тип 2	тип 3
первый осветитель ( $\Delta_1 = 19,51$ мм)	$r=200$ мм, $\varphi=24^{\circ}53'$	$r=200$ мм, $N=600\text{мм}^{-1}$ , $\varphi=16^{\circ}54'$ , $\varphi'=-1^{\circ}28'$	$r=200$ мм, $\varphi=12^{\circ}56'$
второй осветитель ( $\Delta_2 = 48,75$ мм)	$r=200$ мм, $\varphi=28^{\circ}14'$	$r=200$ мм, $N=600\text{мм}^{-1}$ , $\varphi=23^{\circ}54'$ , $\varphi'=-8^{\circ}4'$	$r=200$ мм, $\varphi=18^{\circ}39'$

Показано, что аберрации **осветителей** обеих схем записи ВГДР укладываются в допуски на параметры голографирования.

В разделе 4.3 проведена оценка качества изображения методом расчета **аппаратных функций (АФ)**. Расчет АФ проводился для ширины щели  $0,015$  мм с помощью автоматизированной **программы расчета**, позволяющей учесть аберрации схемы записи в схеме спектрального прибора. Показано, что в случае использования ВГДР, записанной в негомоцентрических пучках, при регистрации спектра на участке цилиндрической поверхности **ширина АФ ( $b'$ )** для **зеркальных** схем записи во всем рабочем диапазоне не превышает  $0,012$  мм, что соответствует пределу разрешения  $\delta\lambda \leq 0,030$  нм, а для схем записи с дифракционными решетками –  $b \leq 0,021$  мм ( $\delta\lambda = 0,052$  нм). При регистрации спектра на двух фотодиодных линейках ширина АФ  $b \leq 0,024$  мм ( $\delta\lambda \leq 0,06$  нм). Показано, что при записи ВГДР в гомоцентрических пучках предел разрешения ниже более чем в два раза.

В пятой главе приведена функциональная и оптическая схемы разработанного прибора, описан макет **спектроанализатора**. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых определялось количественное содержание кобальта в эталонном образце сплава на железной основе. Относительная точность составила  $0,76\%$ .

Закключение. Основные выводы и результаты работы.

1. Показана необходимость создания отечественных приборов для контроля химического состава конструкционных сталей, формализованы требования к **спектроанализатору** и определены пути реализации прибора;
2. На базе общих требований к прибору и анализа существующих оптических схем показано, что требования к спектроанализатору могут быть удовлетворены наиболее перспективно в оптическом блоке на основе вогнутых **голограммных** дифракционных решеток. Характеристики оптической схемы следующие: диапазон работы 245-335нм, частота дифракционной решетки  $2000 \text{ мм}^{-1}$ , радиус дифракционной решетки 200 мм, спектральный предел разрешения 0,06 нм;
3. На базе анализа **коррекционных** возможностей вогнутых голограммных дифракционных решеток показана необходимость записи решетки в негомоцентрических пучках и разработаны схемы записи вогнутых голограммных дифракционных решеток, основанные на дифракционных решетках и вогнутых зеркалах;
4. Математическое моделирование оптической схемы показало, что она удовлетворяет поставленным задачам (спектральный предел разрешения  $\delta\lambda \leq 0,030 \text{ нм}$ );
5. Показано, что модернизация оптического блока малогабаритного спектрографа "Сириус" позволяет создать малогабаритный **спектроанализатор** и осуществить его серийный выпуск.

Основное содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

1. Пяташина И.Г. Определение линейных и угловой координат объекта по однострочному сканированию, VII Всероссийские Туполевские чтения студентов. - Тезисы докладов. - 1996. - Казань - С.116.
2. Определение линейных и угловой координат объекта по однострочному сканированию. Патент РФ №2117242, 1997г. / Рожин В.В., Пяташина И.Г.
3. Пяташина И.Г. Применение спектральной аппаратуры с многоканальной **фотоэлектрической** регистрацией в промышленности. // XXIV Всероссийская молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» - Тезисы докладов -1998г. - Москва.
4. Пяташина И.Г. Применение спектральных приборов с многоканальной системой регистрации. // VIII Всероссийские Туполевские чтения студентов - Тезисы докладов - 1998г. - Казань. - С.101.

5. Пяташина И.Г., Малышева Е.А. Применение спектральных приборов с многоканальной фотоэлектрической регистрацией для обеспечения безопасности производства в химико-металлургическом комплексе. // Третья Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Проблемы безопасности в природных и технических системах **«Безопасность-98»** - Тезисы докладов - 1998 г. - Иркутск.
6. Пяташина И.Г. Применение спектральных приборов с многоканальной системой регистрации для определения состава конструкционных материалов, XXV Международная молодежная научная конференция **«Гагаринские чтения»** - Тезисы докладов - 1999г. - Москва - **С.807-808.**
7. Пяташина И.Г. **Спектроанализатор** на основе вогнутой дифракционной решетки для определения химического состава конструкционных материалов // XXVI Международная молодежная научная конференция **«Гагаринские чтения»** - Тезисы докладов -2000г. - Москва. - С.456.
8. **Павлычева Н.К., Вендеревская И.Г. Голограммные** дифракционные решетки 2-го и 3-го поколений в схеме спектрографа с **плоским полем** // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева- **2001. - №1 - С.28-31.**
9. Вендеревская И.Г. Разработка малогабаритного спектрографа для анализа конструкционных материалов. - Сборник трудов V Международной конференции **«Прикладная оптика»**, - 2002г. - **т.1. - С.147.**
10. **Вендеревская И.Г.** Разработка спектрографа для анализа конструкционных материалов, X Всероссийские Туполевские чтения студентов, - Тезисы докладов - 2002 г. - Казань. - **С.191.**
11. **Вендеревская И.Г.** Разработка спектрографа для анализа конструкционных материалов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева - 2002. - **№4. - С.16-19.**